

鋼トラス橋の時刻歴応答解析に用いる 鋼部材の応力ひずみ関係のモデル化に関する検討

道谷 梓¹・小野 潔²

¹学生会員 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

²正会員 大阪大学大学院准教授 工学研究科 地球総合工学専攻(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

1. はじめに

道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編¹⁾(以下、「道示 V」という)では、地震に対して複雑な挙動を示す構造物に対して、動的解析を行うこととされており、鋼トラス橋は複雑な挙動を示す構造物とされている。鋼トラス橋については、応力-ひずみ関係に非線形性を考慮し、ファイバーモデルを用いた動的解析を行う例が報告されている。ファイバーモデルを用いた動的解析結果は応力-ひずみ関係の影響を受けることが知られているが、ファイバーモデルを用いて鋼トラス橋の動的解析を行う際の適切な非線形性を考慮した応力-ひずみ関係は提案されていないのが現状であると考えられる。

また、道示 V によると、鋼トラス橋弦材等については、その重要性からレベル 2 地震動に対しても応答値が割増係数 1.7 を考慮した許容応力度²⁾以下に留まるように設計することが望ましいと解説されている。そして、動的解析では、線形はり要素を用いるのが良いとされている。

他方、既往の研究^{3),4)}によると、軸力が卓越する鋼部材では、圧縮軸力に対しては降伏応力に達する前に全体座屈を起こすため、軸力-軸方向変位関係が原点に対して非対称となるとともに、軸力-軸方向変位関係に非線形性が表れることが報告されている。鋼トラス橋の耐震性能照査においては、道示 V で解説される通り、線形はり要素を用いた解析により割増係数 1.7 を考慮した許容応力度で照査することが最も確実である。その一方で、既設の鋼トラス橋の耐震性能照査においては、より現実に近い鋼トラス橋弦材の軸力-軸方向変位の非対称性および非線形性を適切に考慮した解析が可能となれば、より適切な耐震性能評価が可能となることが考えられる。

そこで、本稿では、上路式鋼トラス橋を対象に、鋼部材の応力-ひずみ関係を変えて、レベル 2 地震動を入力地震動とした時刻歴応答解析を行った。そして、その解析結果をもとに、鋼部材の応力-ひずみ関係のモデル化が鋼トラス橋の地震時応答に与える影響について検討を行うとともに、今度の検討課題についても整理を行った。

2. 解析モデルおよび解析条件

本研究では、複合非線形骨組解析プログラムとして、汎用プログラム EERC⁵⁾を用いた。解析は 3 次元ファイバーモデルを用いた骨組解析により行った。

(1) 構造モデル

対象とした橋梁は図-1、表-1 に示すような上路式鋼トラス橋⁶⁾であり、3 次元ファイバーモデルでモデル化した骨組構造を図-2 に示す。各支点の変位の拘束条件を表に示す。各支点部の回転については、すべての支点部で橋軸方向回転のみ拘束とした。なお、RC 橋脚である P1 および P2 のいずれもファイバーモデルでモデル化を行った。P1 および P2 とともに橋脚基部は固定であるとした。

(2) 各部位のモデル化

主部材の断面は JSSC のモデル⁶⁾を参考に局部座屈が発生しないように上下弦材、斜材、垂直材の板厚を 22 mm に変更している。断面分割は板厚方向に 1 分割、板幅方向に 10 分割とし、図-3 に示す通りとする。上下弦材、斜材、垂直材以外のコンクリート床版などのモデル化は、JSSC のモデル化の通りとした。また、各部材の部材軸方向の要素分割は 4 分

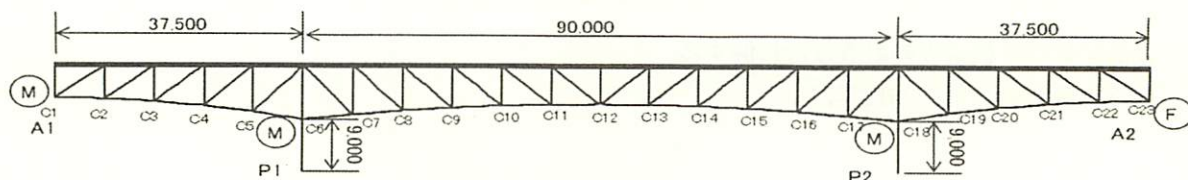


図-1 対象橋梁

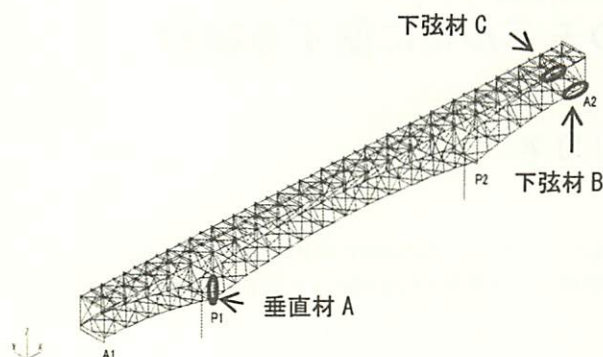


図-2 解析モデル



図-3 主部材の断面分割図

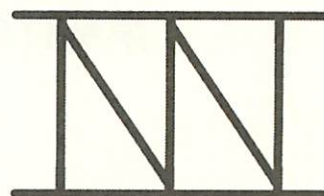


図-4 格点部のモデル化

割以上とし、トラス弦材と腹材格点部の結合条件は図-4 のような剛結とした。拘束条件は表-2 に示す。

なお要素分割数、格点部のモデル化、床板のモデル化については今後詳細な検討が必要であると考えられる。

(3) 応力-ひずみ関係のモデル化

上下弦材、斜材、垂直材に対して図-5(a), (b), (c) に示す 3 つの応力-ひずみ関係を用いて解析を行った。図-5(a) は 2 次勾配を $E/100$ とした応力-ひずみ関係(以下、「対称バイリニアモデル」という)である。図-5(b) は圧縮において鋼部材の全体座屈強度と全体座屈の前の軸力-軸方向変位の非線形性を考慮した応力-ひずみ関係(以下、「非対称バイリニアモデル」という)である。全体座屈の前の非線形性を考慮するため、図-5(b) において応力-ひずみ関係の勾配が変化する線形限界応力 σ_l 、圧縮側の 2 次勾配 E を設定し、これらは既往の研究³⁾を参考に決定した。なお、既往の研究³⁾のモデル化については、今後詳細な検討を行うことが必要であると考え、本稿では他のモデルとの比較を行うための 1 つの参考モデルとして取りあげた。図-5(c) は鋼部材を弾性体とした応力-ひずみ関係(以下、「線形モデル」という)である。図-5(b), (c) の σ_u の全体座屈強度は、道示 II で規定される溶接箱形断面鋼長柱の基準耐荷力曲線から算出される座屈応力度を用いた。

(4) 動的解析条件

入力地震波としては、道示 V¹⁾ に示される I 種地盤のタイプ II の地震波 II-I-1 を用い、この入力地震波を橋軸方向、橋軸直角方向に作用させた。また、

対象橋梁に対して死荷重が作用したときの静的解析を行い、これを初期状態とし、幾何学非線形性を考慮して時刻歴応答解析を行った。積分法としては、ニューマークの β 法を用い、 $\beta=1/4$ とした。減衰についてはレーリー減衰を使用した。そしてレーリー減衰で採用する 2 つのモード次数は、固有値解析結果をもとに、橋軸方向では 2 次(固有周期を 0.487 秒)と 3 次(固有周期を 0.467 秒)、橋軸直角方向では 1 次(固有周期を 0.662 秒)と 7 次(0.203 秒)とした。

3. 解析結果および考察

動的解析結果のうち、橋軸直角方向において応答軸力が最も大きかった部材である垂直材 A と、橋軸方向において応答軸力が最も大きかった部材である下弦材 B の位置を図-2 に示す。それぞれの応答ひずみ ε を降伏ひずみ ε_y で除した $\varepsilon/\varepsilon_y$ の時刻歴を図-6, 図-7 に示す。ところで、応力-ひずみ関係が異なれば、鋼トラス橋の各部材の断面力分布が異なる。本来、断面力分布も合わせて議論すべきではあるが、本稿では、図-6, 7 のひずみの時刻歴応答の違いを考察する際の参考とするため、図-8 (a), (b) に垂直材 A、下弦材 B における応力-ひずみ関係の時刻歴を示す。なお、断面力分布も含めた詳細な検討は今後実施する予定である。図-8 中には圧縮側において全体座屈強度 σ_u/σ_y 、引張側において降伏応力 σ_y/σ_y をそれぞれに示す。図-6 より非対称バイリニアモデルにおいて $\varepsilon/\varepsilon_y$ に大きく差がみられる。この理由として図-8(a) に示すように非対称バイリニアモデルにおける σ_l が σ_u より小さいため、圧縮側のひずみが大きくなったことが考えられる。一方、図-7 より、特に対称バイリニアモデルにおいて最大応答ひずみに差が見られる。この理由として、線形モデルでは弾性であるため応力自体が大きくなったこと、

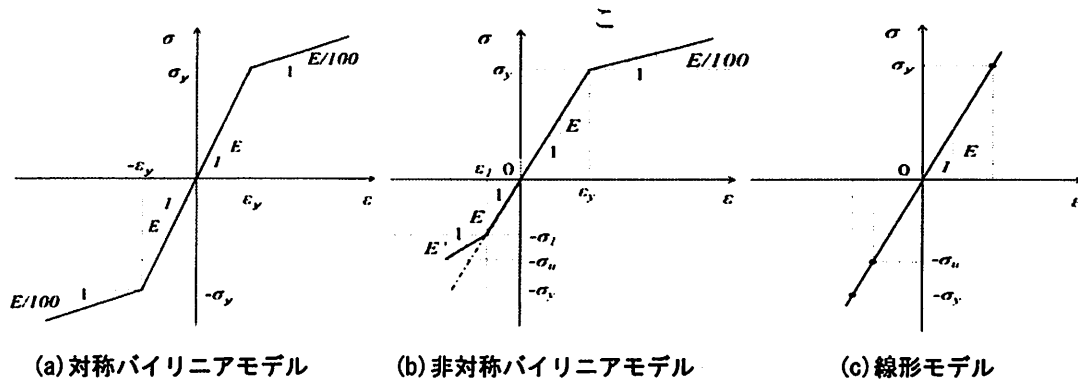


図-5 応力-ひずみ関係のモデル化

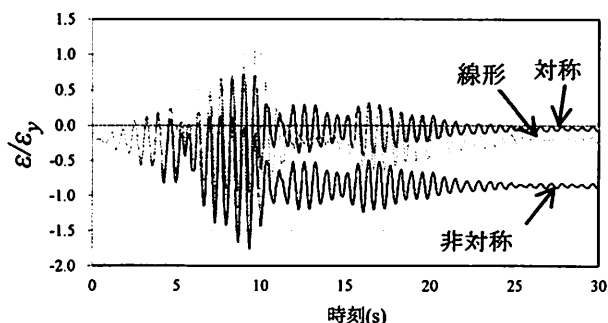


図-6 垂直材 A における ϵ/ϵ_y の時刻歴応答

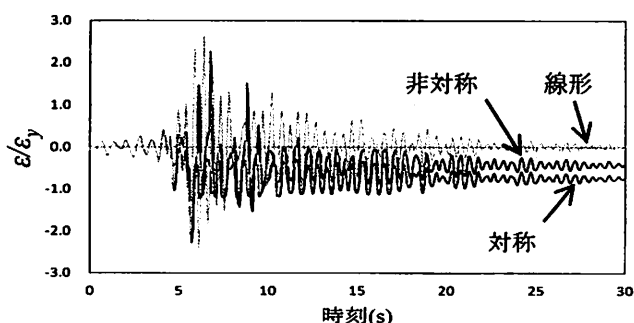


図-7 下弦材 B における ϵ/ϵ_y の時刻歴応答

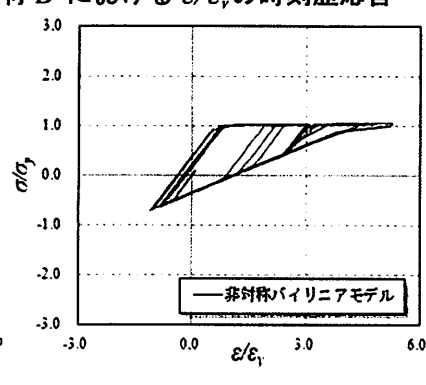
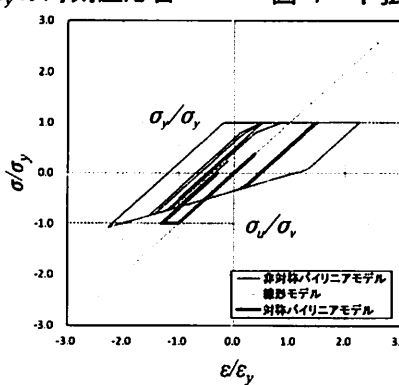
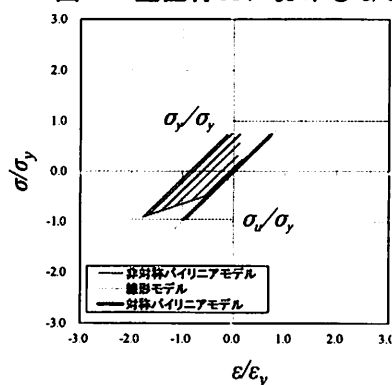


図-8 応力-ひずみ関係の履歴

非対称バイリニアモデルでは2次勾配が小さいことにより、それぞれ対称バイリニアモデルより最大応答ひずみが大きくなったと考えられる。図-8(a)、(b)より、どちらの部材についても圧縮側においては座屈強度または降伏応力、引張側においては降伏応力と応答値との関係がそれぞれのモデルによって異なるため、応力-ひずみ関係のモデル化の違いが耐震性能評価に影響を与えることがわかる。また、橋軸方向に地震動を与えた場合、図-2に示す下弦材Cの応力-ひずみ履歴は図-8(c)に示すような不自然な履歴となっている。引張側の許容の値によっては、このような不自然な履歴となる大きな引張ひずみが生じる場合には、耐震性能を満足しないと評価されて断面の見直しとなるため、実設計上、問題になる

とはないかもしれないが、このような不自然な履歴が生じた理由として、圧縮側の線形限界応力 σ_l 以降の応力-ひずみ関係の勾配が大きすぎたことが一因であると考えられる。このように応力-ひずみ関係を非対称なものとする場合には、許容値の設定も含めて今後詳細な検討が必要である。

ところで、今回の解析では解析モデルの格点部を剛結したため、上弦材、下弦材の他、垂直材、斜材等にも曲げモーメントが生じている。図-8では、参考のために道示IIの鋼長柱の座屈強度および降伏応力を記述したが、実際の耐震設計では、軸力のみならず曲げモーメントの影響を考慮して耐震性能の照査を行う必要がある、そのための許容値および照査手法の開発も必要である。さらに、軸力が卓越する

鋼部材の軸力-軸方向変位に関するデータは非常に少ないため、実験および実験との比較により妥当性を検証したモデルにより、それからデータを蓄積することが最重要かつ不可欠であると言える。

上記のように、鋼トラス橋弦材の軸力-軸方向変位の非線形性を考慮して応力-ひずみ関係のモデル化が可能となれば、本稿の検討の例では、弾性解析の場合と比較して応答応力が小さくなることから、合理的に耐震性能を評価できる可能性もある。その一方で、非線形性を考慮した応力-ひずみ関係のモデル化、許容値等について解決すべき検討課題が多く残されている。今後、これら課題を解決して軸力が卓越する鋼部材の合理的な耐震性能照査手法を開発するため、実験および解析により軸力が卓越する鋼部材の耐力および変形性能を把握するとともに、動的解析に用いるモデル化の検討等を行う予定である。

4. まとめ

本稿では、鋼部材の圧縮側における応力-ひずみ関係の違いが鋼トラス橋の地震時応答に与える影響について検討および問題点の整理を行った。その結果、応力-ひずみ関係のモデル化によってひずみ、または直応力の時刻歴応答に差が見られるため耐震性能評価に影響を与えること、応力-ひずみ関係のモデル化によっては不自然な履歴の応力-ひずみ関係となることがわかった。また、耐震性能照査に用いる許容値および照査法を開発するとも必要である。

今後、これら課題を解決して合理的な耐震性能照査手法を開発するため、実験および解析等を行う予定である。

5. 謝辞：本稿で用いた鋼トラス橋の解析モデルの作成を行うにあたり、(株)地震工学研究開発センターの野中哲也氏、馬越一也氏に助言いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，丸善，2012.3.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，丸善，2012.3.
- 3) 谷上裕明：軸力が卓越する矩形断面鋼部材の耐荷力および変形性能に関する研究，大阪大学修士論文，2011.2.
- 4) 吉山純平，松村政秀，山口隆司，小野潔，谷上裕明：軸方向力が卓越して作用する無補剛箱形断面鋼製柱部材の繰返し載荷実験，第66回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.1279-1280，2011.9
- 5) (株)地震工学研究開発センター：EERC/Fiber User's Manual，2007.
- 6) (社)日本鋼構造協会：ファイバーモデルを用いた鋼橋の動的耐震解析の現状と信頼向上，2009.9.